جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارهٔ سی و پنجم، پاییز ۱۳۹۹

صص ۱۲۳-۹۹

DOI: https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2020.67013.0

مقاله پژوهشی

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای فضاهای شهری با کاربست تئوری کاتاستروف (مورد: شهر ورزقان)

پریچهر مصری علمداری[۱]- استادیار اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

منصور خیری‌زاده آروق - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱۳ تاریخ بازنگری : ۱۳۹۹/۹/۳۰ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۶

چکیده

هدف اصلی پژوهش حاضر ارائه یک چارچوب روش‌شناسی برای ارزیابی سریع و کارآمد آسیب‌پذیری فضاهای شهری نسبت به زلزله است. بسیاری از متغیرهای مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرها از ماهیت مکانی برخوردار هستند؛ ازاین‌رو استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در ترکیب و یکپارچه نمودن این متغیرها می‌تواند به نتایج مطلوبی منجر شود. با این حال، یکی از مهم‌ترین مسائل روی‌هم‌گذاری لایه‌های داده در سیستم اطلاعات جغرافیایی مربوط به عدم قطعیت‌های وزن‌دهی و تصمیم‌گیری است. در پژوهش حاضر سعی شد که با استفاده از توابع تئوری کاتاستروف این‌گونه عدم قطعیت‌ها تا حد زیادی تعدیل شوند. در تئوری کاتاستروف، اهمیت هر یک از متغیرها از طریق مکانیسم درونی سیستم محاسبه می‌شود. درواقع، استفاده از رویکرد مذکور باعث تکرارپذیری نتایج مدل می‌گردد که مزیتی قابل‌توجه به شمار می‌رود. ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان با استفاده از توابع تئوری کاتاستروف نشان می‌دهد که بالغ بر ۹ درصد از محدوده قانونی شهر در کلاس آسیب‌پذیری بسیار زیاد و ۱۲ درصد آن در کلاس آسیب‌پذیری زیاد واقع شده است. در این رابطه، بخش عمده‌ای از مرکز شهر ورزقان در برابر زلزله از آسیب‌پذیری بالایی برخوردار است. تراکم بالای مسکونی و ساختمانی، کیفیت پایین ساختمان‌ها، قدمت بالا و مصالح نامطلوب بناها، محصورشدگی و کمبود فضاهای باز شهری، لیتولوژی و زیربنای سست، عدم دسترسی مطلوب به خدمات بیمارستانی و آتش‌نشانی و غیره منجر به افزایش آسیب‌پذیری این بخش از شهر شده است.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری، زلزله، تئوری کاتاستروف، GIS، شهر ورزقان.

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۴۱۱۳۲۰۲ Email: p_mesry_a@yahoo.com

۱– مقدمه

تخمین زده می‌شود که در طی دو دهه گذشته، بلایای طبیعی مسئول مرگ حدود سه میلیون نفر و آسیب دیـدن ۸۰۰ میلیون نفر دیگر شده‌اند. مطابق برآورد دفتر هماهنگ‌کننده امدادرسانی سازمان ملل، بلایای طبیعی همه‌ساله بالغ بر ۳۰ الی ۵۰ میلیارد دلار ضرر و زیان اقتصادی را در کل دنیا باعث می‌گردند (سندرز و کلارک[۱]، ۲۰۱۰: ۵) آمارهای مرتبط با بلایا (به‌عنوان‌مثال EM-DAT، ۲۰۰۸) نشان می‌دهند که اثرات بلایا در سطح جهان به‌شدت در حال افزایش است. بسیاری از این بلایا ناشی از رخدادهای حدی ژئومورفولوژیکی هستند (آلکانتارا آیالا و گودی[۲]،۲۰۱۰: ۲۲۱). در این رابطه، زمین‌لرزه‌ها در زمره مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی در سطح جهان به شمار مـی‌رونـد کـه منجـر بـه خسارت شدید کالبدی، اجتماعی و اقتصادی می‌شوند. قرارگیری شهرها در مناطق مستعد خطر، شهرنشینی و رشد جمعیت و افزایش اقدامات رفاهی از مهم‌ترین دلایل آسیب‌پذیری زیاد فضاهای شهری در برابر زمین‌لرزه‌هـا اسـت (دوزگان و همکاران[۳]، ۲۰۱۱: ۹۱۸). پیش‌بینی مکان یا موقعیت دقیق، زمان، مدت و شدت زمین‌لرزه‌ها امکـان‌پـذیر نیست. با این حال، می‌توان خسارت‌های احتمالی را تخمین زد. نقشه‌های آسیب‌پذیری شهرها می‌تواند به برنامه‌ریزی مؤثر در پاسخ به سوانح کمک کند (مرادی[٤] و همکاران، ۲۰۱٤: ۲۰۹).

ارزیابی تلفات و خسارت‌های مورد انتظار ناشی از رخدادهای خطرناک مستلزم تحلیل فضایی است زیرا تمامی مؤلفه‌های ارزیابی ریسک در فضا و زمان تغییر می‌کنند؛ بنابراین ارزیابی خطر، آسیب‌پذیری و ریسک تنها زمانی می‌تواند به صورت مؤثر انجام شود که ابزارهایی مورد استفاده قرار گیرند که با اطلاعات فضایی از قبیـل سیسـتم‌هـای اطلاعات جغرافیایی سر و کار دارند (آلکانتارا آیالا و گودی،۲۰۱۰: ۲۲۱). در این رابطه، یکی از عمده‌ترین فعالیت‌ها در راستای کاهش خطرات ناشی از زمین‌لرزه و افزایش ایمنی عمومی، مطالعه‌های پهنه‌بندی لرزه‌ای مناطق شهری و روستایی است که بایستی در مقیاس مناسب و مطلوب صورت پذیرد. پهنه‌بندی لرزه‌ای در تعیین کـاربری شـهری، جابه‌جایی سازه‌های مهم و تأسیسات و شریان‌های حیاتی شهری، طراحی و اجرای سازه‌ها، مدیریت بحران در حین وقوع زمین‌لرزه و نظایر آن مورد استفاده قرار می‌گیرد (رحیمی شهید و رحیمی، ۱۳۹٦: ۱۰۹–۱۱۸). در ایـن راسـتا، محققان مختلف عمدتاً از ترکیب مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[٥] (MCDM) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته‌اند. در این زمینه می‌توان به قنبری و همکاران (۱۳۹۲)، نیری و همکاران (۱۳۹۵)، رمضانی کیاسج‌محله و همکاران (۱۳۹۵)، فلاحی و اسدی (۱۳۹۵)، فاضل و همکاران (۱۳۹٦)، نوروزی طولا و بینایی (۱۳۹۷)، طبیبیـان و مظفری (۱۳۹۷)، کرمی و امیریان (۱۳۹۷)، جعفرنیا و همکـاران (۱۳۹۸)، خـدادادی و همکـاران (۱۳۹۹)، ارمـاس[٦]

---
1 Sanders and Clark
2 Alcántara-Ayala and Goudie
3 Duzgan
4 Moradi
5 Multiple Criteria Decision Making
6 Armas

(۲۰۱۲)، راشد و ویک[1] (۲۰۱۲)، مرادی و همکاران (۲۰۱٤)، سین‌ها[2] و همکاران (۲۰۱٤)، ارماس و همکاران (۲۰۱۷) و ژنگ[3] و همکاران (۲۰۲۰) اشاره نمود. در مدل‌سازی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای محاسبه اهمیت نسبی هر یک از معیارها از فرایند وزن‌دهی بهره گرفته می‌شود. در این زمینه، روش‌های وزن‌دهی مختلفی ارائه گردیده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته روش‌های ذهنی[4] و عینی[5] گروه‌بندی نمود. در رویکردهای وزن‌دهی ذهن‌گرایانه، وزن هر یک از معیارها براساس دانش و قضاوت تصمیم‌گیران به‌دست می‌آید که تا حد زیادی سلیقه‌ای می‌باشند. در رویکردهای وزن‌دهی عینی، برای محاسبه وزن‌ها از مدل‌های ریاضیاتی بهره گرفته می‌شود. از روش‌های وزن‌دهی ذهن‌گرایانه می‌توان به ترکیب خطی وزنی (WLC)، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، روش تجمع وزنی (WAM)، مدل جمع وزنی (WSM)، و غیره اشاره نمود (احمد[6] و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۳۹–۵٤۹). این روش‌ها اکثراً به دلیل ذهن‌گرایی و عدم قطعیت‌های ذاتی مورد انتقاد جدی قرار گرفته‌اند (سو[7] و همکاران، ۲۰۱۱: ۷۳۷–۷٤٦). با عطف به موارد مذکور، در این پژوهش به منظور حذف و یا کاهش عدم قطعیت‌های مرتبط با تصمیم‌گیری از توابع تئوری کاتاستروف جهت محاسبه میزان اهمیت معیارهای مؤثر بر آسیب-پذیری لرزه‌ای شهرها بهره گرفته شد. رویکرد ارزیابی مبتنی بر تئوری کاتاستروف مشتمل بر سلیقه و قضاوت‌های ذهنی تصمیم‌گیران نیست؛ بلکه اهمیت یک معیار بر معیار دیگر را به‌واسطه مکانیسم درونی آن مورد محاسبه قرار می‌دهد و بدین ترتیب، ذهن‌گرایی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد (احمد و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۳۹–۵٤۹). این رویکرد تمامی معیارها را یکپارچه ساخته و بر معایب مرتبط با ذهن‌گرایی و عدم قطعیت غلبه پیدا می‌کند (سو و همکاران، ۲۰۱۱: ۷۳۷–۷٤٦). تئوری کاتاستروف، به عنوان یک تئوری ریاضیاتی، پدیده‌های ناپیوسته را بر اساس توپولوژی و تئوری پایداری ساختاری مورد مطالعه قرار می‌دهد (وانگ[8] و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۵٦–۳٦۲). در طی سال‌های اخیر پژوهش‌هایی در زمینه کاربست توابع تئوری کاتاستروف در موضوعات مختلف صورت گرفته است. تیان– ژون[9] و همکاران (۲۰۰۹) به منظور پیش‌بینی انفجار زغال‌سنگ و گاز در معادن ازاین‌روش بهره گرفتند. این مدل توسط سو و همکاران (۲۰۱۱) برای ارزیابی وضعیت امنیت اکولوژیکی زمین در شانگهای چین به کار گرفته شد. خیائو–ژون[10] و همکاران (۲۰۱٤) از تئوری کاتاستروف جهت ارزیابی امنیت آب و استراتژی سازگار در زمینه

---

1 Rashed & Week
2 Sinha
3 Zheng
4 Subjective
5 Objective
6 Ahmed
7 Su
8 Wang
9 Tian-jun
10 Xiao-jun

تغییرات محیطی استفاده به عمل آوردند. یو و ژانگ[1] (۲۰۱۵) به ارزیابی آسیب‌پذیری اجتماعی نسبت به سیلاب‌ها در حوضه رودخانه هوای‌هی با روش مبتنی بر تئوری کاتاستروف پرداختند. احمد و همکاران (۲۰۱۵) برای ارزیابی پهنه‌های بالقوه آب زیرزمینی در منطقه خشک استان بلوچستان پاکستان از توابع تئوری کاتاستروف در ترکیب با سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند. همین رویکرد توسط صادق‌فام و همکاران (۲۰۱٦) برای ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت مراغه مورد استفاده قرار گرفت.

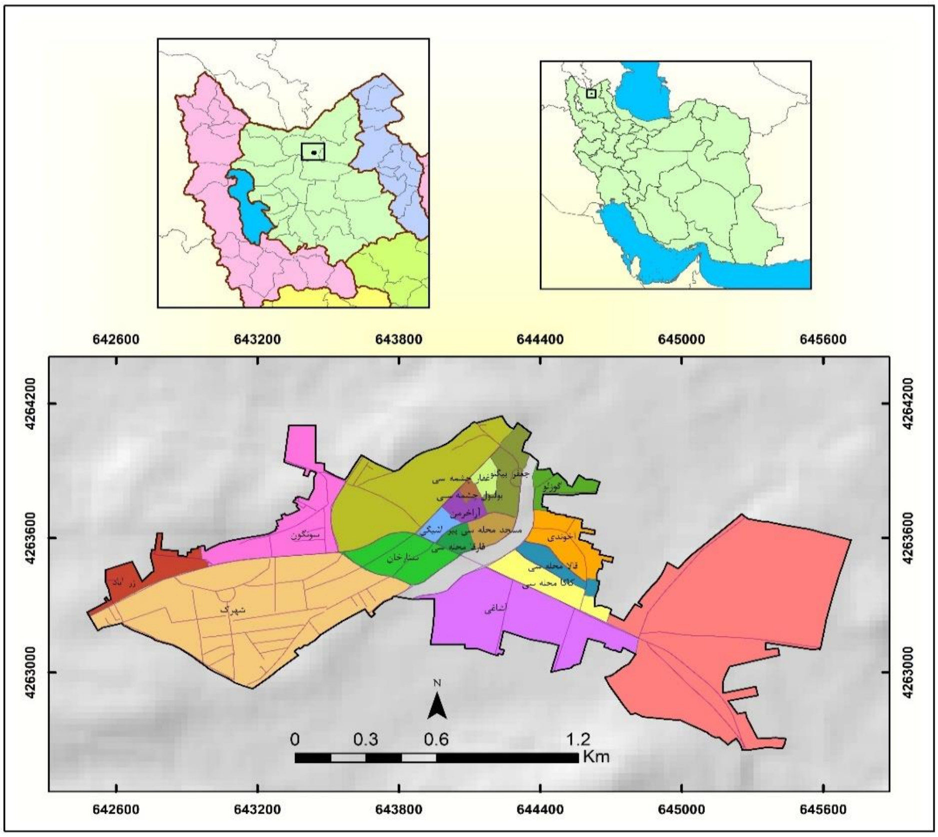
هدف پژوهش حاضر معرفی روش‌شناسی مبتنی بر توابع تئوری کاتاستروف به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرهاست. کاربست تئوری کاتاستروف مسائل مرتبط با عدم قطعیت‌های تصمیم‌گیری و کلاسه‌بندی داده‌ها را تا حد زیادی رفع می‌کند. رویکرد مذکور به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان به کار بسته شد. این شهر سابقه زمین‌لرزه نسبتاً شدید در سال‌ها اخیر را دارد. دو زمین‌لرزه پی در پی، اولی در ساعت ١٦:۵۳ روز شنبه مورخ ۱۳۹۱/۵/۲۱ با بزرگای گشتاوری ٦/٤ در فاصله ۲۳ کیلومتری غرب اهر و دومی در ساعت ۱۷:۰٤ با بزرگای گشتاوری ٦/۳ در ۳۰ کیلومتری اهر و در حدود ۵۰ کیلومتری شمال شرق تبریز موجب تلفات جانی و خسارت مالی و هراس مردم در پهنه رومرکزی در استان آذربایجان شرقی شد. این زلزله‌ها با ژرفای کانونی حدود ۱۰ کیلومتر و سازوکار امتدادلغز بوده و موجب کشته شدن ۲۵۸ نفر و مجروح شدن ۱۳۸۰ نفر گردید. بیش‌ترین تلفات انسانی از روستاهای باجه باج، گوردره و دبنو و شهر ورزقان گزارش شده است (مهدوی‌فر و معماریان، ۱۳۹۱: ۲). در راستای اهداف پژوهش می‌توان سؤالاتی بدین شرح مطرح نمود: الف) آیا کاربست توابع تئوری کاتاستروف در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرها از کارایی مطلوبی برخوردار است؟ و ب) وضعیت شهر ورزقان از نظر آسیب‌پذیری نسبت به وقوع زلزله چگونه است؟

۲- معرفی منطقه مطالعاتی

در پژوهش حاضر آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان (مرکز شهرستان ورزقان) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این شهر با موقعیت جغرافیایی ٤٦ درجه و ۳۸ دقیقه و ۲ ثانیه تا ٤٦ درجه و ٤۰ دقیقه و ۱۷ ثانیه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه و ۲ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه و ۵۰ ثانیه عرض شمالی در شمال استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱). شهر ورزقان در ٤۰ کیلومتری غرب اهر و ۷۸ کیلومتری شمال تبریز واقع گردیده است. ارتفاع متوسط این شهر در حدود ١٦۷۰ متر از سطح دریا می‌باشد. این شهر در پایکوه‌های شمالی رشته‌کوه قره‌داغ واقع شده و به دره ساختمانی اهرچای ختم می‌شود. رودخانه ورزقان‌چای از مرکز شهر عبور کرده و این شهر را به دو نیمه غربی و شرقی تقسیم می‌کند. اراضی زراعی اطراف شهر، رودخانه و اراضی پرشیب را می‌توان جزو مهم‌ترین محدودیت‌های توسعه فضایی- کالبدی ورزقان برشمرد. جمعیت شهرستان ورزقان مطابق سرشماری سال ۱۳۹۵

1 You & Zhang

(مرکز آمار کشور) بالغ بر ۵۲٦۵۰ نفر بوده که نسبت به سال ۱۳۹۰ رشدی در حدود ۲/۸۳ درصد را تجربه کرده است. از این تعداد بالغ بر ۵۳٤۸ نفر ساکن شهر ورزقان می‌باشند که نسبت به سال ۱۳۹۰ کاهشی در حدود ۰/۱٤ درصدی را نشان می‌دهد. این امر نشان‌دهنده مهاجرت برخی از اهالی شهر می‌باشد که حاکی از مشکلاتی بنیادین از قبیل ضعف زیرساخت‌ها، اشتغال، انزوای جغرافیایی و غیره در این شهر می‌باشد.



شکل ۱- قلمرو جغرافیایی شهر ورزقان (کارتوگرافی: نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)

۳- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نوع کمّی- کیفی یا ترکیبی است. همچنین رویکرد پژوهش توصیفی- تحلیلی بوده و از نظر هدف جزو پژوهش‌های کاربردی محسوب می‌گردد. متغیرهای متعددی بر میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرها تأثیر می‌گذارند. در این پژوهش، شاخص‌های مورد استفاده به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان را می‌توان از سه جنبه مورد توجه قرار داد: الف) شاخص‌های سازه‌ای که شامل کیفیت بنا، عمر بنا، نوع مصالح بنا و تعداد طبقات می‌باشند؛ ب) شاخص‌های برنامه‌ریزی که در بستر موضوعاتی مانند توزیع فضایی ایستگاه‌های آتش‌نشانی،

بیمارستان‌ها، دسترسی به فضاهای باز، تراکم مسکونی و فاصله از تأسیسات خطرزا مورد توجه قرار گرفتند؛ ج) شاخص‌های طبیعی که در این رابطه از دو متغیر شیب و لیتولوژی استفاده به عمل آمد. متغیر فاصله از گسل‌ها به دلیل فاصله تقریباً یکسان تمامی قسمت‌های شهر از گسل‌های منطقه و همچنین پوشیده بودن گسل‌های احتمالی مجاور شهر در پهنه‌بندی لحاظ نشد. درواقع، این متغیر به دلیل توزیع فضایی همگن از اهمیت یکسانی در مدل‌سازی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر برخوردار است. برای آماده‌سازی و محاسبه شاخص‌های فوق‌الذکر از داده‌های طرح جامع شهر ورزقان (۱۳۹۸)، نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه با قدرت تفکیک ۲۷ متر استفاده به عمل آمد.

به منظور ترکیب و یکپارچه نمودن شاخص‌ها یا متغیرهای مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان از توابع تئوری کاتاستروف بهره گرفته شد. این توابع، رابطه بین متغیر حالت (آسیب‌پذیری لرزه‌ای) و متغیرهای کنترل (کیفیت بنا، عمر بنا، فاصله از تأسیسات خطرزا و غیره) را مشخص می‌سازند. مشخصه اصلی این رویکرد، ارزیابی وزن‌های شاخص‌های مورد استفاده نیست بلکه اهمیت نسبی آن‌ها مورد توجه می‌باشد (تیان ژون و همکاران، ۲۰۰۹: ٤۳۰-٤۳٤). در تئوری کاتاستروف، متغیرهای تابع[1] سیستم به متغیرهای حالت وابسته[2] و متغیرهای کنترل[3] تفکیک می‌شوند. متغیرهای حالت وابسته، متغیرهای درونی سیستم می‌باشند و متغیرهای کنترل، فاکتورهای مؤثر خارجی حین اجرای سیستم هستند (خیائو- ژون و همکاران، ۲۰۱٤: ٤٦۳-٤۷۷). به‌عنوان‌مثال، در پژوهش حاضر، آسیب‌پذیری لرزه‌ای متغیر حالت یا پاسخ و کیفیت بنا، عمر بنا و ... متغیرهای کنترل به شمار می‌روند. وابستگی متغیرهای حالت بر متغیرهای کنترل توسط توابع عضویت فازی کاتاستروفیک- و نه وزن‌های تخصیص یافته توسط کاربران- تعیین می‌شود. در این رابطه، هفت مدل کاتاستروف وجود دارد که عبارتنداز: کاتاستروف فولد[4]، کاتاستروف کاسپ[5]، کاتاستروف دم فاخته‌ای[6]، کاتاستروف پروانه‌ای[7]، کاتاستروف دم‌چلچله‌ای[8]، کاتاستروف هایپربولیک اومبیلیک[9] و کاتاستروف پارابولا اومبیلیک[10] (احمد و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۳۹-۵٤۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۵٦-۳٦۲). این مدل‌ها در جدول (۱) ارائه گردیده‌اند. در این جدول، x نشان‌دهنده متغیر حالت و a، b، c، d نشان‌دهنده متغیر کنترل می‌باشند.

1 Function variables
2 Dependent state variables
3 Control variables
4 Fold catastrophe
5 Cusp catastrophe
6 Dovetail catastrophe
7 Butterfly catastrophe
8 swallowtail catastrophe
9 hyperbolic umbilical catastrophe
10 parabola umbilical catastrophe

جدول ۱- هفت نوع مدل کاتاستروف

مدل کاتاستروف	پارامترهای کنترل	متغیرهای حالت	تابع پتانسیل
فولد	۱	۱	$V_a(x)=1/3x^3+ax$
کاسپ	۲	۱	$V_{ab}(x)=1/4x^4+1/2ax^2+bx$
دم فاخته‌ای	۳	۱	$V_{abc}(x)=1/5x^5+1/3ax^3+1/2bx^2+cx$
پروانه‌ای	۴	۱	$V_{abcd}(x)=1/6x^5+1/4ax^4+1/3bx^3+1/2cx^2+dx$
دم چلچله‌ای	۳	۲	$V_{abc}(x,y)=x^3-xy^2+a(x^2+y^2)+bx+cy$
الیپتیک اومبیلیک	۳	۲	$V_{abc}(x,y)=x^3-xy^2+a(x^2+y^2)+bx+cy$
پارابولیک اومبیلیک	۴	۲	$V_{abc}(x,y)=x^2y+y^4+ax^2+by^2+cx+dy$

منبع: (احمد و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۳۹-۵٤۹؛ خیائو-ژون و همکاران، ۲۰۱۱: ٤٦۳-٤۷۷)

تئوری کاتاستروف جهت ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان در طی مراحلی بدین شرح به کار بسته شد: انتخاب شاخص‌ها، نرمالیزه کردن شاخص‌ها، تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر تئوری کاتاستروف و ارزیابی آسیب‌پذیری. مراحل مذکور جهت حفظ پیوستگی مطالب در یافته‌های پژوهش ارائه شده‌اند. خاطر نشان می‌شود که مدل‌سازی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) صورت پذیرفت.

٤- یافته‌ها

٤- ۱- ایجاد سیستم شاخص

جهت ارزیابی آسیب‌پذیری شهر ورزقان نسبت به مخاطره زلزله با استفاده از توابع تئوری کاتاستروف، سیستم شهر به تعدادی زیرسیستم تقسیم‌بندی شد. هر کدام از این زیرسیستم‌ها شامل تعدادی از شاخص‌های ارزیابی می‌باشند. در ادامه، توزیع فضایی این شاخص‌ها در سطح شهر ورزقان به‌اختصار تبیین می‌شوند.

کاربری اراضی: در پژوهش حاضر، لایه کاربری اراضی (شکل ۲) به منظور ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر ورزقان وارد مدل شد. در این رابطه، کاربری‌های اراضی شهر مطالعاتی از نظر آسیب‌پذیری لرزه‌ای به پنج کلاس از آسیب‌پذیری بسیار کم تا آسیب‌پذیری بسیار زیاد طبقه‌بندی شد (جدول ۳). کاربری‌های مسکونی، آموزشی و تجاری به دلیل تراکم بالای جمعیتی جزو آسیب‌پذیرترین کاربری‌های شهری محسوب شدند. کاربری مسکونی با حدود ۱۸ درصد (بالغ بر ۳٦ هکتار) سهم قابل‌توجهی از مساحت شهر ورزقان را به خود اختصاص داده است. این کاربری با

عطف به جمعیت ساکن آن در زمره آسیب‌پذیرترین کاربری‌ها در شرایط بحرانی و اضطرار، به‌ویژه زلزله‌ای شدید با حجم بالای تخریب و ویرانی، به شمار می‌رود.

تراکم مسکونی: تراکم مسکونی به عنوان نسبت مساحت کاربری‌های مسکونی به مساحت منطقه تعریف می‌شود. در پژوهش حاضر این معیار به عنوان جایگزین معیار تراکم جمعیت به کار گرفته شد (به دلیل عدم دسترسی به داده‌های جمعیتی بلوک‌های شهری). در حالت تطبیقی، تراکم مسکونی بالا نشان‌دهنده جمعیت بیشتر و آسیب‌پذیری لرزه‌ای بیشتر می‌باشد. در شکل (۳) تراکم مسکونی در سطح محلات شهر ورزقان ارائه شده است. سه محله بولبول چشمه‌سی، قالامحله‌سی و آخوندی با تراکم مسکونی بیش از ۰/٦ دارای بالاترین میزان تراکم مسکونی هستند. این محلات در هسته اولیه یا مرکزی شهر واقع شده‌اند. مقادیر بالاتر این شاخص دلالت بر حجم بالای ساخت و ساز در محله است و در نقطه مقابل، مقادیر پایین تا حدودی بیانگر وجود اراضی باز و خالی از قبیل اراضی کشاورزی، بایر و فضای سبز در سطح محله می‌باشد. در حالت تطبیقی، محلاتی از شهر ورزقان که دارای تراکم مسکونی بالایی می‌باشند به دلیل محدودیت فضا، محصورشدگی، احتمال تخریب زیاد و عدم دسترسی مطلوب جزو آسیب‌پذیرترین محلات شهر محسوب می‌شوند.

دسترسی به ایستگاه‌های آتش‌نشانی: از میان کاربری‌ها و خدمات موجود در شهر، ایستگاه‌های آتش‌نشانی علاوه بر اینکه به عنوان مراکز اصلی اطفای حریق عمل می‌کنند، همواره از مراکز مهم امداد و نجات در سایر سوانح نظیر زلزله، سیل، آب‌گرفتگی معابر و ... به‌حساب می‌آیند (فلاح علی‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۵: ۸۲). در پژوهش حاضر، نزدیکی به ایستگاه‌های آتش‌نشانی به دلیل امکانات خدمات‌رسانی سریع‌تر این کاربری در موقع حوادث غیرمترقبه مزیتی مهم محسوب شده و درنتیجه، مناطق مجاور ایستگاه‌های آتش‌نشانی به عنوان نواحی با آسیب‌پذیری کم درنظر گرفته شده و با فاصله گرفتن از این مراکز آسیب‌پذیری نیز روند افزایشی پیدا می‌کند. در شهر ورزقان تنها یک ایستگاه آتش‌نشانی وجود دارد (شکل ٤). این ایستگاه در جنوب غرب شهر (محله شهرک) استقرار یافته است. براساس فاصله استاندارد ۱۰۰۰ متری (پورمحمدی، ۱۳۸۲: ۷۸)، تعداد ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود در سطح شهر ورزقان مطلوب نبوده و فاصله زیادی از استانداردهای موجود دارد. کمبود ایستگاه‌های آتش‌نشانی مخصوصاً در محلات مرکزی- با تراکم بالای مسکونی و ساختمانی- از نمود بیشتری برخوردار است.

دسترسی به بیمارستان‌ها: ازجمله محورهای برنامه‌ریزی و اقدام در مواجهه با پدیده زلزله، ارائه خدمات سلامت کارا و اثربخش به زلزله‌زدگان می‌باشد. در قلب هر برنامه عرضه خدمات سلامت، بیمارستان‌ها دارای جایگاه ویژه‌ای می‌باشند (سیدین و همکاران، ۱۳۹۳: ٦٦). در این رابطه، شهر ورزقان دارای یک بیمارستان در شرق شهر می‌باشد. می‌توان گفت که قسمت‌های میانی و غربی شهر در شعاع عملکردی مناسب بیمارستان شهر واقع نشده‌اند. در

پژوهش حاضر، معیار دسترسی به بیمارستان‌ها تحت عنوان لایه شعاع عملکردی بیمارستان‌ها در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان به کار بسته شد (شکل ۵).

مجاورت با تأسیسات خطرزا: تأسیسات خطرزا تأسیساتی هستند که در ارتباط با مواد خطرناک می‌باشند. این تأسیسات می‌توانند به مخاطرات ثانویه‌ای از قبیل آتش‌سوزی و انفجار منجر گردند. استقرار و مکان‌گزینی کاربری‌هایی با پتانسیل بالای آسیب‌رسانی در مجاورت با کاربری‌های دیگر باعث افزایش آسیب‌پذیری می‌شود. به همین دلیل انتقال این نوع تأسیسات خطرزا به خارج از محدوده شهر یا تخصیص حریم مناسب برای آن‌ها، می‌تواند راه‌کار مطلوب به منظور کاهش آسیب‌رسانی آن‌ها به شمار آید (جایکا، ۱۳۸۰: ۹۷). در شکل (٦) توزیع فضایی تأسیسات خطرزا در محدوده شهر ورزقان ارائه شده است. این تأسیسات شامل پمپ‌بنزین‌ها، ایستگاه‌های CNG، پست برق قوی و پست تقلیل فشار گاز می‌باشند. این تأسیسات، مواد قابل اشتعال و خطرناکی مانند بنزین و گاز را در خود ذخیره می‌کنند. به هنگام رخداد زلزله احتمال ترکیدگی یا انفجار و آتش‌سوزی این‌گونه تأسیسات بالاست؛ بنابراین این تأسیسات علاوه بر اینکه نسبت به مخاطره زلزله آسیب‌پذیر هستند می‌توانند باعث آسیب‌رسانی به کاربری‌های مجاور خود نیز بشوند. به همین دلیل در حالت تطبیقی مناطق مجاور یا نزدیک این تأسیسات از آسیب-پذیری بالایی در برابر زلزله برخوردار می‌باشند. آسیب‌رسانی این تأسیسات تحت عنوان لایه فاصله از تأسیسات خطرزا در ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر ورزقان دخالت داده شد (شکل ٦).

دسترسی به فضاهای باز عمومی: فضاهای باز نقش مهمی در کاهش وسعت میزان عمل و نتایج اکثریت حوادث طبیعی و مصنوعی دارد (ساسان‌پور و همکاران، ۱۳۹٦: ۱۱۵). همان‌گونه که نقشه فضاهای باز و دسترسی به این فضاها در محدوده شهر ورزقان (شکل ۷) نشان می‌دهد این فضاها در حاشیه‌های شهر دارای وسعت قابل‌توجهی هستند. این در حالی است که قسمت‌های مرکزی شهر، مخصوصاً محلات مسجد محله‌سی، آخوندی، قالامحله‌سی، بولبول چشمه‌سی، غفارچشمه‌سی و قارقا محله‌سی، از محدودیت شدیدی در رابطه با دسترسی به فضاهای باز شهری برخوردار می‌باشند. این امر به دلیل تراکم بالای ساختمانی و مسکونی و کمبود فضاهای سبز و سایر کاربری-های مربوطه در قسمت‌های مرکزی شهر می‌باشد. این محلات به دلیل فقدان فضاهای باز و سبز شهری و همچنین تراکم بالای ساختمانی از آسیب‌پذیری بالایی نسبت به خطر وقوع زلزله برخوردار می‌باشند.

کیفیت ساختمان: کیفیت بنا یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای می‌باشد؛ بنابراین، این شاخص در ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر ورزقان مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۸). بر اساس محاسبات صورت گرفته، بالغ بر ۳۳/۳ درصد ساختمان‌ها و بناهای شهر ورزقان از نظر کیفیت جزو ساختمان‌های نوساز می‌باشند. همچنین در حدود ۷ درصد ساختمان‌ها در گروه ساختمان‌های در حال ساخت جای می‌گیرند. ساختمان‌های مذکور در حالت تطبیقی از کم‌ترین میزان آسیب‌پذیری در برابر مخاطره زلزله برخوردار هستند. در حدود ۵۳/۱ درصد ساختمان‌های

شهر ورزقان در طبقه کیفیتی قابل نگهداری و ۵/۸ درصد در طبقه کیفیتی مرمتی قرار دارند که از آسیب‌پذیری متوسطی نسبت به مخاطره زلزله برخوردارند. درنهایت تقریباً ۰/۹ درصد از ساختمان‌ها در گروه ساختمان‌های تخریبی قرار دارند که نسبت به مخاطره زلزله به‌شدت آسیب‌پذیر می‌باشند؛ بنابراین از نظر این شاخص، بخش قابل‌توجهی از ساختمان‌ها و بناهای موجود در شهر ورزقان در گروه آسیب‌پذیری متوسط تا بالا جای می‌گیرند. در حالت کلی، هسته اولیه شهر از نظر کیفیت ساختمان‌ها در وضعیت مطلوبی قرار ندارد.

نوع سازه و مصالح ساختمان: مصالح ساختمانی جزو معیارهای مهم در ارزیابی آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله به شمار می‌رود. در این رابطه، بخش قابل‌توجهی از ساختمان‌های شهر ورزقان (با درصد فراوانی حدود ۵۷/۵ درصد) با استفاده از مصالح آجر و آهن ساخته شده‌اند (شکل ۹). این مصالح از آسیب‌پذیری متوسطی نسبت به زلزله برخوردارند. بالغ بر ۲۳/۸ درصد ساختمان‌ها دارای اسکلت بتنی و ۱۰/۹ درصد ساختمان‌ها نیز دارای اسکلت فلزی می‌باشند. این ساختمان‌ها از آسیب‌پذیری لرزه‌ای پایینی نسبت به سایر مصالح برخوردارند. در حدود ٤/٦ درصد ساختمان‌ها از آجر و چوب، در حدود ۰/۲ ساختمان‌ها از بلوک و آهن، ۰/۰۵ درصد از بلوک و چوب، ۱/۲ درصد از خشت و چوب و ۱/۸ درصد از سنگ ساخته شده‌اند. تمامی این ساختمان‌ها با تفاوت‌هایی از آسیب‌پذیری بالایی نسبت به مخاطره زلزله برخوردار هستند.

قدمت ساختمان: در شرایط برابر بدیهی است که هرچه عمر ساختمان بیشتر باشد مقاومت ساختمان‌ها در برابر تکانه‌های زمین‌لرزه کاهش پیدا کرده و میزان آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد. در این رابطه، بالغ بر ۲۷/۸ درصد ساختمان‌ها و بناهای شهر ورزقان دارای عمری کمتر از ۵ سال می‌باشند که در حالت تطبیقی از پایین‌ترین آسیب-پذیری در برابر زلزله برخوردارند. در حدود ۲۱/۸ درصد ساختمان‌ها دارای عمری بین ۵ تا ۱۵ سال می‌باشند. همچنین، بالغ بر ۳۹/٤ درصد ساختمان‌ها دارای عمری بین ۱۵ تا ۳۰ سال و در حدود ۱۰/۹ درصد نیز دارای عمر بیش از ۳۰ سال می‌باشند (شکل ۱۰). این ساختمان‌ها به علت قدمت زیاد از آسیب‌پذیرترین ساختمان‌های شهر در برابر زلزله می‌باشند. از طرف دیگر، اغلب این ساختمان‌ها علاوه بر عمر زیاد از کیفیت پایینی نیز برخوردارند که آسیب‌پذیری لرزه‌ای آن‌ها را مضاعف می‌نماید.

تعداد طبقات ساختمان‌ها: هر چه تعداد طبقات ساختمان بیشتر باشد احتمال آسیب‌پذیری آن در برابر زلزله بیشتر خواهد بود؛ چراکه ارتفاع ساختمان، رفتار ساختمان‌ها را در طول وقوع یک زلزله متأثر می‌کند. در این رابطه، اکثر ساختمان‌های شهر ورزقان شامل ساختمان‌های یک طبقه می‌باشند (شکل ۱۱). درواقع، بالغ بر ۷۸/۷ درصد ساختمان‌های شهر ورزقان یک طبقه، ۱۳/۹ درصد ساختمان‌های ۲ طبقه، ۷/٤ درصد ساختمان‌های ۳ طبقه و ۰/۰۵ درصد ساختمان‌های ۵ طبقه می‌باشند. ساختمان ٤ طبقه‌ای نیز در این شهر وجود ندارد. ساختمان‌های یک طبقه اکثراً

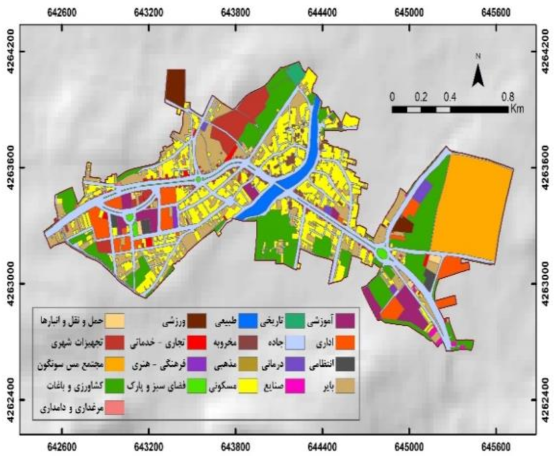
در هسته مرکزی (اولیه) شهر ساخته شده‌اند و عمده ساختمان‌های بلند مرتبه نیز در مناطق جدیدالتاسیس پراکنده گردیده‌اند.

وضعیت لیتولوژیکی شهر: مواد تشکیل دهنده زمین از قبیل سنگ بستر، ماسه، شن، سیلت و گل و لای نسبت به امواج زلزله دارای واکنش‌های متفاوتی هستند؛ به عنوان نمونه احتمال دارد که میزان تکانه و لرزش در رسوبات منفصل بسیار شدیدتر از سنگ بستر باشد (کلر و پینتر[1]، ۱۹۹٦: ۲۱)؛ بنابراین، هر چه سازندهای زمین‌شناسی سخت‌تر و مقاوم‌تر باشد به کاهش توان موج لرزه‌ای و ازاین‌رو تضعیف قدرت تخریبی زلزله منجر می‌گردد (کوبورن و اسپنس[2]، ۲۰۰۳: ٥٤۱–٥٥۲). شهر ورزقان بر روی چهار واحد زمین‌شناسی توسعه یافته است (شکل ۱۲) که به ترتیب آسیب‌پذیری عبارتنداز: واحد Qt2 که متشکل از نهشته‌های آبرفتی جوان بوده و ترکیبی از قلوه‌سنگ، ماسه، سیلت و رس می‌باشد. این واحد به دلیل منفصل بودن و مقاومت پایین جزو آسیب‌پذیرترین واحدهای سنگ‌شناختی در مقابل تکانه‌ها و ارتعاشات زمین‌لرزه محسوب می‌شود و درنتیجه به دلیل تشدید ارتعاشات، بناها و ساختمان‌های مستقر بر روی این واحد از آسیب‌پذیری بالایی برخوردار می‌باشند. این واحد در حدود ۱۹ درصد از محدوده شهر ورزقان را پوشش می‌دهد که عمدتا در قسمت‌های میانی شهر رخنمون یافته‌اند. واحد Qt1 دومین واحد زمین‌شناسی در محدوده شهر ورزقان است که شامل آبرفت‌های کواترنری قدیمی می‌باشد و در برخی از موارد همراه با کنگلومرا بوده و به صورت محلی سیمانی شده‌اند. این واحد در حدود ۹ درصد از محدوده شهر را پوشش می‌دهد و از نظر آسیب‌پذیری در مرتبه دوم قرار می‌گیرد. واحد PlQc وسیع‌ترین واحد زمین‌شناسی در محدوده شهر ورزقان محسوب می‌شود و بالغ بر ٤۷ درصد از سطح شهر را پوشش می‌دهد. این واحد شامل کنگلومرا، سیلت و مارن می-باشد و به طور عمده در قسمت‌های غربی شهر رخنمون یافته است. این واحد هر چند در مقایسه با آبرفت‌های جوان و قدیمی کواترنری از مقاومت و استحکام بالاتری برخودار است اما به دلیل سیمان سست از مقاومت بالایی در برابر ارتعاشات و تکانه‌های زمین‌لرزه برخوردار نمی‌باشد. درنهایت، واحد PlQv در حدود ۲٥ درصد از سطح شهر ورزقان را دربرمی‌گیرد و شامل سنگ‌های آتشفشانی اسیدی، مارن، سیلت و ایگنمبریت می‌باشد. این سازند در مقایسه با سایر سازندهای رخنمون یافته در سطح شهر ورزقان از مقاومت بالاتری در برابر تکانه‌های زلزله برخوردار است.

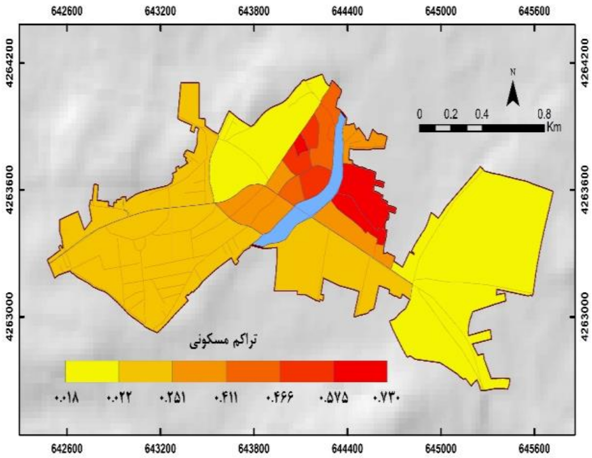
شیب: در حالت کلی، هر چه شیب سطح زمین افزایش پیدا کند میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله نیز بیشتر می-شود (احدنژاد روشتی و جلیل پور، ۱۳۹۲: ۳۷). در پژوهش حاضر، شیب منطقه مطالعاتی از روی تصویر DEM منطقه با قدرت تفکیک ۲۷ متر تهیه شد. میانگین شیب در محدوده قانونی شهر ورزقان در حدود ٤ درصد است. پراکندگی سطوح شیب در سطح شهر ورزقان از وضعیت ناهمواری‌ها و ژئومورفولوژی منطقه تبعیت می‌نماید.

1 Keller and Pinter
2 Coburn and Spence

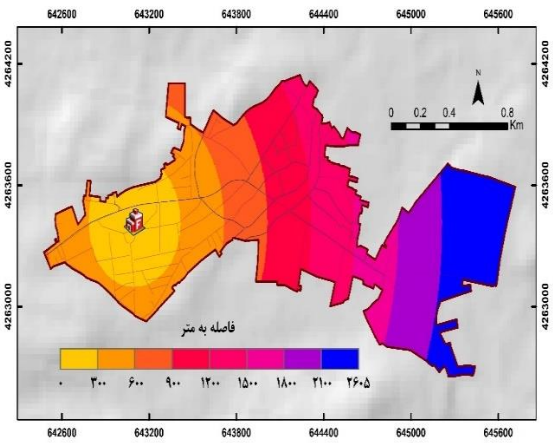
جهات عمومی شیب در سطح شهر به تبعیت از روند ناهمواری‌ها و جهت حرکت روان‌اب‌های سطحی دارای جهات عمومی شمال به جنوب است. محدوده شهر ورزقان عمدتاً شامل اراضی هموار و کم شیب است (شکل ۱۳). درواقع، هسته اولیه شهر ورزقان بر روی اراضی هموار (با شیب کمتر از ۳ درصد) مکان‌گزینی شده است. با وجود این، روند توسعه شهر در جهات شرقی و غربی در طی سال‌های اخیر موجب شده است که قسمت‌هایی از شهر دارای شیب‌های نسبتاً تندی باشند که این امر باعث افزایش آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر می‌شود.



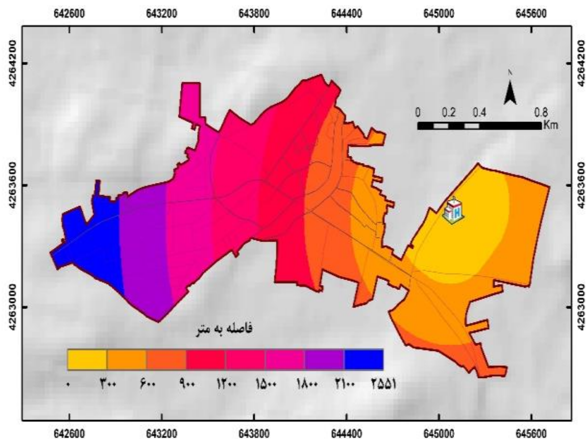
شکل ۲- کاربری اراضی شهر ورزقان (کارتوگرافی: نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)



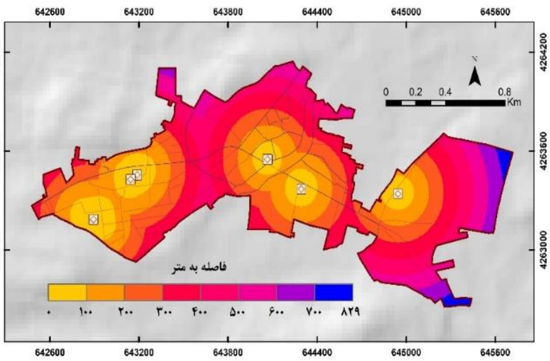
شکل ۳- تراکم مسکونی محلات شهر ورزقان (منبع: محاسبات نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)



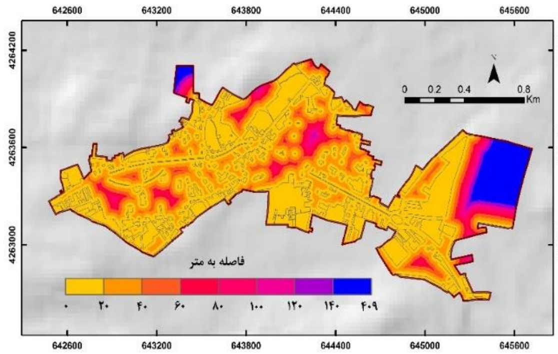
شکل ٤- شعاع سرویس‌دهی ایستگاه آتش‌نشانی ورزقان (منبع: نگارندگان)



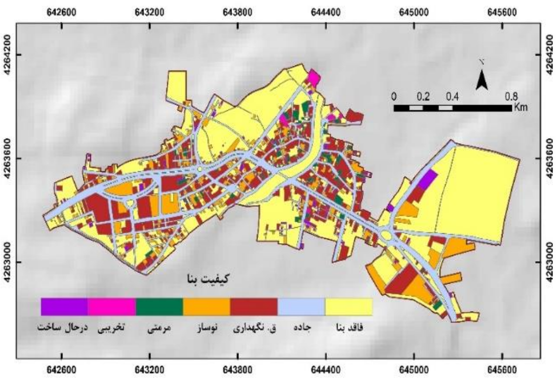
شکل ٥- شعاع عملکردی بیمارستان ورزقان (منبع: نگارندگان)



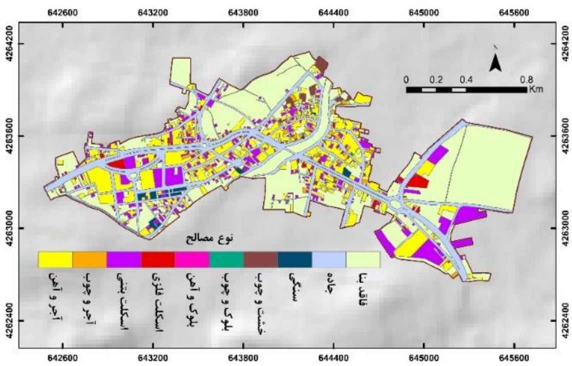
شکل ٦- فاصله از تأسیسات خطرزا در محدوده شهر ورزقان (منبع: محاسبات نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)



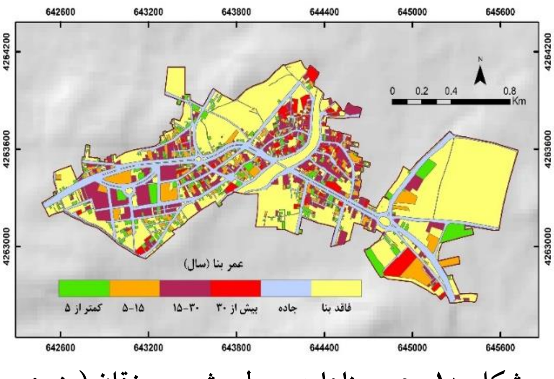
شکل ۷- دسترسی به فضاهای باز شهری در محدوده شهر ورزقان (منبع: محاسبات نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)



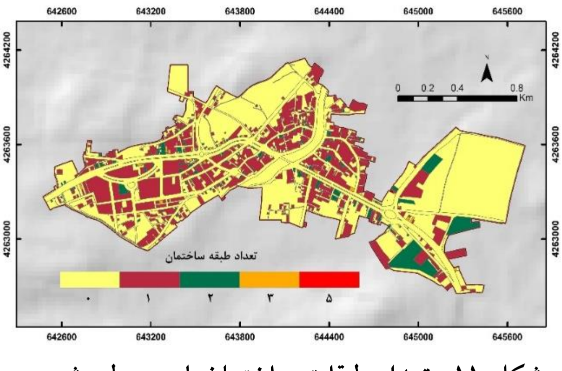
شکل ۸- کیفیت بناها در سطح شهر ورزقان (منبع: نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)



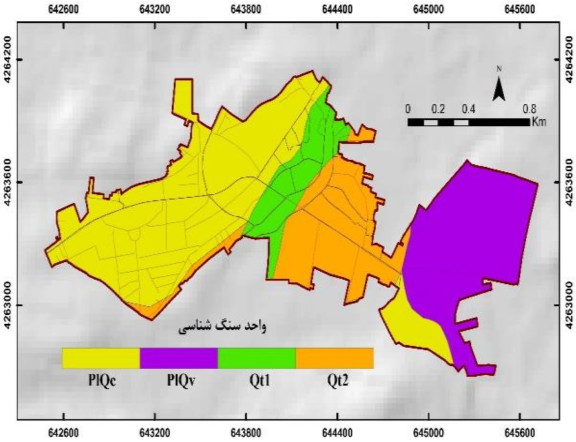
شکل ۹- نوع مصالح بناها در سطح شهر ورزقان (منبع: نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)



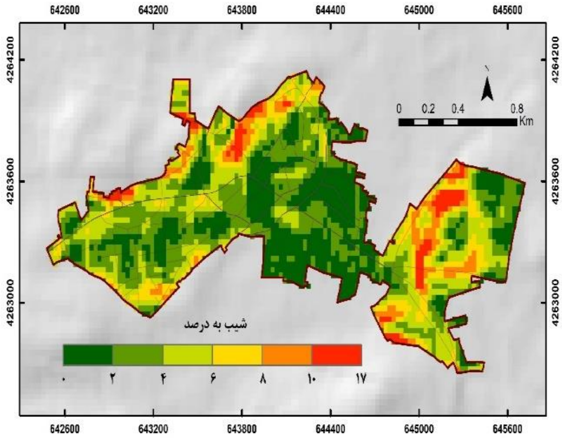
شکل ۱۰- عمر بناها در سطح شهر ورزقان (منبع: محاسبات نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)



شکل ۱۱- تعداد طبقات ساختمان‌ها در سطح شهر ورزقان (منبع: محاسبات نگارندگان بر اساس داده‌های طرح جامع شهر ورزقان، ۱۳۹۷)



شکل ۱۲- لیتولوژی محدوده شهر ورزقان (منبع: سازمان زمین‌شناسی)



شکل ۱۳- توزیع فضایی شیب در سطح شهر ورزقان (منبع: تصاویر Aster)

٤- ۲- نرمال‌سازی شاخص‌ها

دامنه و واحدهای شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر یکسان نیستند؛ درنتیجه، نرمالیزه نمودن شاخص‌ها ضرورت پیدا می‌کند. درواقع، در طی فرایند نرمالیزه‌سازی داده‌ها بی‌بعد شده و بدین ترتیب مساله عدم تناسب شاخص‌ها رفع می‌شود. در این پژوهش، به منظور نرمالیزه‌سازی لایه‌های رستری شاخص‌های مورد استفاده دو معادله زیر به کار بسته شد (احمد و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۳۹-٥٤۹):

معادله مورد استفاده جهت نرمالیزه‌سازی شاخص‌های «بزرگ‌تر بهتر» یا «بزرگ‌تر آسیب‌پذیرتر»:

$$x_i' = \frac{x_i - x_{i\ (min)}}{x_{i\ (max)} - x_{i\ (min)}}$$ رابطه (۱)

معادله مورد استفاده جهت نرمالیزه‌سازی شاخص‌های «کوچک‌تر بهتر» یا «کوچک‌تر آسیب‌پذیرتر»

$$1 - \frac{x_i - x_{i\ (min)}}{x_{i\ (max)} - x_{i\ (min)}}$$ رابطه (۲)

که در آن، i شاخص یا صفت، x_i مقدار اولیه i و $x_{i(max)}$ و $x_{i(min)}$ مقادیر حداکثر و حداقل می‌باشند. مقادیر بالاتر شاخص‌های تراکم مسکونی، تعداد طبقات ساختمان، شیب، فاصله از فضاهای باز عمومی و فاصله از شعاع عملکردی بیمارستان‌ها و مراکز آتش‌نشانی منجر به افزایش آسیب‌پذیری در برابر زلزله می‌شوند؛ بنابراین برای نرمال‌سازی این شاخص‌ها از معادله «بزرگ‌تر بهتر» یا به تعبیر دیگر «بزرگ‌تر آسیب پذیرتر» (معادله ۱) استفاده شد. برعکس، مقادیر پایین‌تر شاخص مجاورت با تأسیسات خطرزا باعث افزایش آسیب‌پذیری لرزه‌ای می‌شوند. بدین ترتیب می‌بایست معادله «کوچک‌تر بهتر» یا «کوچک‌تر آسیب پذیرتر» (معادله ۲) برای نرمال کردن این شاخص به

کار بسته شود. در مورد شاخص‌های کیفی نیز براساس افزایش آسیب‌پذیری کدبندی صورت گرفت و از معادله (۱) برای نرمال‌سازی استفاده به عمل آمد.

٤- ۳- تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر تئوری کاتاستروف

همانگونه که بیان گردید جهت ارزیابی آسیب‌پذیری شهر ورزقان نسبت به مخاطره زلزله با کاربست توابع تئوری کاتاستروف، سیستم شهر به تعدادی زیرسیستم تقسیم‌بندی گردید. هر کدام از این زیرسیستم‌ها شامل تعدادی از شاخص‌های ارزیابی می‌باشند. مطابق با رویکرد کاتاستروف، زیرسیستم می‌تواند فولد (یک شاخص)، کاسپ (دوشاخص)، دم‌چلچله‌ای (سه شاخص)، پروانه‌ای (چهارشاخص) و ویگ‌وام (پنج شاخص) باشد. در پژوهش حاضر، برای تعیین نوع تابع کاتاستروف شاخص‌های کمّی از روش بهینه‌سازی جنکس بهره گرفته شد. در این روش، نقاط شکست کلاس بر اساس گروه‌هایی که دارای مقادیر مشابهی بوده و حداکثر اختلاف را با گروه‌های دیگر نشان می‌دهند تعیین می‌گردند. درواقع، روش مذکور یک روش خوشه‌بندی داده محسوب می‌شود که چیدمان بهینه مقادیر را در کلاس‌های مختلف مشخص می‌سازد. این روش به دنبال یافتن حداقل انحراف میانگین از میانگین کلاس است درحالیکه انحراف هر کلاس از میانگین‌های سایر کلاس‌ها را حداکثر می‌سازد؛ بنابراین، واریانس داخل کلاس‌ها را کاهش داده و واریانس بین کلاس‌ها را حداکثر می‌سازد (جنکس[1]، ۱۹٦۷: ۱۸٦-۱۹۰).

تصاعد کاتاستروف[2] هر متغیر کنترل می‌تواند از روی تابع تبعی فازی اولیه[3] براساس فرمول‌های نرمالیزه‌سازی محاسبه شود. در طی فرایند محاسبه، دو اصل به کار گرفته می‌شود: اصل مکمل[4] و اصل غیرمکمل[5]. اصل غیرمکمل بدین معنی است که متغیرهای کنترل یک سیستم، ازقبیل a، b، c، و d، نمی‌توانند جایگزین یکدیگر شوند؛ بنابراین، هنگام یافتن مقدار متغیر حالت x با استفاده از فرمول‌های نرمالیزه‌سازی، کوچک‌ترین مقادیر متغیر حالت متناظر با متغیرهای کنترل است، یعنی $x=\min\{x_a, x_b, x_c, x_d\}$ به عنوان مقدار متغیر حالت کل سیستم انتخاب می‌شوند. از سوی دیگر، اصل مکمل به این اشاره دارد که متغیرهای کنترل، مکمل همدیگرند به طوریکه هر یک از آن‌ها تمایل دارند تا به مقدار میانگین برسند؛ یعنی $x=(x_a+x_b+x_c+x_d)/4$ (احمد و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۳۹-٥٤۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۱: ۳٥٦-۳٦۲). در پژوهش حاضر، اصل مکمل برای محاسبه تصاعد کاتاستروف هر متغیر کنترل مورد استفاده قرار گرفت. توابع عضویت فازی کاتاستروف هر شاخص مطابق جدول (۲) محاسبه می‌شود. نتایج حاصل در جدول (۳) ارائه شده است.

1 Jenks
2 Catastrophe progression
3 Initial fuzzy subordinate function
4 Complementary
5 Non-complementary

جدول ۲- توابع عضویت فازی کاتاستروف

نام	متغیر حالت	متغیر کنترل	فرمول نرمال کردن
کاسپ	۱	۲	$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$
دم چلچله‌ای	۱	۳	$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$
پروانه‌ای	۱	٤	$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$ and ${x_d}^{1/5}$
ویگ‌وام	۱	۵	$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$ and ${x_d}^{1/5}$ and ${x_e}^{1/6}$

منبع: (احمد و همکاران، ۲۰۱۵: ۵۳۹-٥٤۹)

جدول ۳- جزئیات روش وزن‌دهی کاتاستروف جهت تلفیق سیستم‌های شاخص مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان

لایه داده	پارامترهای کنترل	شاخص‌ها	میانگین	انحراف معیار	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	تابع کاتاستروف	عضویت فازی کاتاستروف	اولویت مبتنی بر اصل مکمل	وزن
تراکم مسکونی	۰/۰۲۰ ≤ کلاس۱ ≤ ۰	بسیار کم	۰/۰۱۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	ویگ وام	۰/۰۰۰	۰/۶۷۸۹	۰/۶
	۰/۲٤۹ ≤ کلاس۲ < ۰/۰۲۰	کم	۰/۱۵۹	۰/۰۸۲	۰/۲٤۱		۰/۶۲۲		
	۰/٤۰۹ ≤ کلاس۳ < ۰/۲٤۹	متوسط	۰/۲۹۶	۰/۰۵۷	۰/٤۷۳		۰/۸۲۹		
	۰/۵۳۸ ≤ کلاس٤ < ۰/٤۰۹	زیاد	۰/٤۵۶	۰/۰۳۲	۰/۷٤٤		۰/۹٤۳		
	۰/۷۳۰ ≤ کلاس۵ < ۰/۵۳۸	بسیار زیاد	۰/۶۰۷	۰/۰٤۰	۱/۰۰۰		۱/۰۰۰		
شعاع سرویس-دهی آتش‌نشانی	۵۲۱ ≤ کلاس۱ ≤ ۰	بسیار مناسب	۲۹۲/۹	۱۲۷/۹	۰/۰۰۰	ویگ وام	۰/۰۰۰	۰/۶۸٤۱	۰/۹
	۱۰٤۲ ≤ کلاس۲ < ۵۲۱	مناسب	۷۸٤/۲	۱۵۷/۲	۰/۲٤۷		۰/۶۲۷		
	۱۵۶۳ ≤ کلاس۳ < ۱۰٤۲	نسبتاً مناسب	۱۲۷۱/۹	۱۳۷/۸	۰/٤۹۲		۰/۸۳۷		
	۲۰۸٤ ≤ کلاس٤ < ۱۵۶۳	نامناسب	۱۸۸۲/۸	۱۳۱/۹	۰/۷۹۸		۰/۹۵۶		
	۲۶۰۵ ≤ کلاس۵ < ۲۰۸٤	بسیار نامناسب	۲۲۸٤/۲	۱۳۲/٤	۱/۰۰۰		۱/۰۰۰		
تأسیسات خطرزا	۲۵۰ ≤ کلاس۱ ≤ ۰	بسیار خطرناک	۱٤٤/۳	۶۶/۲	۱/۰۰۰	دم‌چلچله‌ای	۱/۰۰۰	۰/۶۰۱۰	۰/۲

لایه داده	پارامترهای کنترل	شاخص‌ها	میانگین	انحراف معیار	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	تابع کاتاستروف	عضویت فازی کاتاستروف	اولویت مبتنی بر اصل مکمل	وزن
	۵۰۰ ≤ کلاس۲ > ۲۵۰	نسبتاً خطرناک	۳۵۸/۵	۶۷/۹	۰/۵۱۸		۰/۸۰۳		
	۸۲۹ ≤ کلاس۳ > ۵۰۰	نسبتاً بی-خطر	۵۸۸/۶	۷۱/۲	۰/۰۰۰		۰/۰۰۰		
عمر بنا	کلاس ۱ = کمتر از ۵ سال	جدید	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	پروانه‌ای	۰/۰۰۰	۰/۶۴۹۲	۰/۵
	کلاس ۲ = ۵ تا ۱۵ سال	نسبتاً قدیمی	۲/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۳۳۳		۰/۶۹۳		
	کلاس ۳ = ۱۵ تا ۳۰ سال	قدیمی	۳/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۶۶۷		۰/۹۰۴		
	کلاس ٤ = بیش از ۳۰ سال	بسیار قدیمی	٤/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰		۱/۰۰۰		
شعاع عملکردی بیمارستان	۵۱۰ ≤ کلاس۱ ≤ ۰	بسیار مناسب	۳۰۰/۷	۱٤۱/۵	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۰/۶۷۹۸	۰/۷
	۱۰۲۰ ≤ کلاس۲ > ۵۱۰	مناسب	۷٤۷/۰	۱۵٤/۳	۰/۲۳۱		۰/۶۱٤		
	۱۵۳۱ ≤ کلاس۳ > ۱۰۲۰	نسبتاً مناسب	۱۲۵٤/٤	۱۵٤/۲	۰/٤۹٤		۰/۸۳۸		
	۲۰٤۱ ≤ کلاس٤ > ۱۵۳۱	نامناسب	۱۷۷٤/۱	۱٤۳/۶	۰/۷۶۳		۰/۹٤۷		
	۲۵۵۱ ≤ کلاس۵ > ۲۰٤۱	بسیار نامناسب	۲۲۳۲/۱	۱۲۹/۸	۱/۰۰۰		۱/۰۰۰		
دسترسی به فضاهای باز	۳۰ ≤ کلاس۱ ≤ ۰	مناسب	۸/۳۸	۸/۹۸	۰/۰۰۰	پروانه‌ای	۰/۰۰۰	۰/۵۸۶۸	۰/۱
	۷۰ ≤ کلاس۲ > ۳۰۰	نسبتاً مناسب	٤۵/٤۷	۱۰/۸۸	۰/۱۷۵		۰/۵۶۰		
	۱۲۰ ≤ کلاس۳ > ۷۰	نامناسب	۸۹/۶۱	۱٤/۱۸	۰/۳۸٤		۰/۷۸۷		
	٤۰۹ ≤ کلاس۳ > ۱۲۰	بسیار نامناسب	۲۱۹/۸٤	۷٤/۶۱	۱/۰۰۰		۱/۰۰۰		
طبقات بنا	کلاس ۱ = ۱ طبقه	حساسیت کم	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	پروانه‌ای	۰/۰۰۰	۰/۶۱۷۷	۰/۳
	کلاس ۲ = ۲ طبقه	حساسیت نسبتاً کم	۲/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۵۰		۰/۶۳۰		
	کلاس ۳ = ۳	حساسیت	۳/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۵۰۰		۰/۸٤۱		

لایه داده	پارامترهای کنترل	شاخص‌ها	میانگین	انحراف معیار	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	تابع کاتاستروف	عضویت فازی کاتاستروف	اولویت مبتنی بر اصل مکمل	وزن
	طبقه	زیاد							
	کلاس ٤ = ٥ طبقه	حساسیت بسیار زیاد	٥/٠٠٠	٠/٠٠٠	١/٠٠٠		١/٠٠٠		
کیفیت بنا	کلاس ١= در حال ساخت	مقاومت بالا	١/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٠٠٠	ویگ‌وام	٠/٠٠٠	٠/٦٨٣٠	٠/٨
	کلاس ٢ = نوساز	مقاومت بالا	٢/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٢٥٠		٠/٦٣٠		
	کلاس ٣ = قابل نگهداری	مقاومت متوسط	٣/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٥٠٠		٠/٨٤١		
	کلاس ٤ = مرمتی	مقاومت پایین	٤/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٧٥٠		٠/٩٤٤		
	کلاس ٥ = تخریبی	مقاومت بسیار پایین	٥/٠٠٠	٠/٠٠٠	١/٠٠٠		١/٠٠٠		
مصالح بنا	کلاس ١= اسکلت بتنی و فلزی	استحکام بالا	١/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٠٠٠	پروانه‌ای	٠/٠٠٠	٠/٦٤٩٢	٠/٥
	کلاس ٢ = آجر و آهن- بلوک و آهن	استحکام متوسط	٢/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٣٣٣		٠/٦٩٣		
	کلاس ٣ = آجر و چوب- بلوک و چوب	استحکام کم	٣/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٦٦٧		٠/٩٠٤		
	کلاس ٤ = خشت و چوب- سنگی	استحکام بسیار کم	٤/٠٠٠	٠/٠٠٠	١/٠٠٠		١/٠٠٠		
کاربری	کلاس ١= بایر، کشاورزی، ف. سبز، طبیعی	حساسیت بسیار کم	١/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٠٠٠	ویگ‌وام	٠/٠٠٠	٠/٦٨٣٠	٠/٨
	کلاس ٢ = مرغداری، دامداری، مجتمع مس سونگون، مخروبه، جاده	حساسیت کم	٢/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٢٥٠		٠/٦٣٠		
	کلاس ٣ =	حساسیت	٣/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٥٠٠		٠/٨٤١		

لایه داده	پارامترهای کنترل	شاخص‌ها	میانگین	انحراف معیار	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	تابع کاتاستروف	عضویت فازی کاتاستروف	اولویت مبتنی بر اصل مکمل	وزن
	مذهبی، تجهیزات شهری، ورزشی، انبارداری، فرهنگی، هنری، انتظامی	متوسط							
	کلاس ٤ = اداری، تاریخی، درمانی، صنایع	حساسیت زیاد	٤/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٧٥٠		٠/٩٤٤		
	کلاس ٥ = مسکونی، آموزشی، تجاری	حساسیت بسیار زیاد	٥/٠٠٠	٠/٠٠٠	١/٠٠٠		١/٠٠٠		
لیتولوژی	کلاس ١ = PlQv	مقاوم	١/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٠٠٠	پروانه‌ای	٠/٠٠٠	٠/٦٤٩٢	٠/٥
	کلاس ٢ = PlQc	نسبتاً مقاوم	٢/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٣٣٣		٠/٦٩٣		
	کلاس ٣ = Qt1	سست	٣/٠٠٠	٠/٠٠٠	٠/٦٦٧		٠/٩٠٤		
	کلاس ٤ = Qt2	بسیار سست	٤/٠٠٠	٠/٠٠٠	١/٠٠٠		١/٠٠٠		
شیب	٣ ≤ کلاس١ ≤ ٠	ملایم	١/٦٠	٠/٨٦	٠/٠٠٠	پروانه‌ای	٠/٠٠٠	٠/٦٤٠٣	٠/٤
	٦ ≤ کلاس٢ < ٣	نسبتاً ملایم	٤/٣٦	٠/٨٧	٠/٣٠٣		٠/٦٧١		
	٩ ≤ کلاس٣ < ٦	تند	٧/٣١	٠/٧٨	٠/٦٢٧		٠/٨٩٠		
	١٧ ≤ کلاس٤ < ٩	بسیار تند	١٠/٧٠	١/٤٤	١/٠٠٠		١/٠٠٠		

٤- ٤- تلفیق لایه‌ها و ارزیابی آسیب‌پذیری فضایی شهر ورزقان در برابر مخاطره زلزله

اکثر نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی قابلیت روی‌هم‌گذاری[1] لایه‌های رستری را دارند. در این رابطه، به منظور روی‌هم‌گذاری لایه‌های مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان ابتدا وزن‌های حاصل از تئوری کاتاستروف به هر کدام از لایه‌های رستری نرمال شده مربوطه ضرب شدند؛ بدین ترتیب لایه‌های رستری موزون حاصل گردید. در نهایت لایه‌های رستری موزون جمع بسته شدند. در لایه رستری حاصله، مقادیر بیشتر هر پیکسل نشان دهنده آسیب‌پذیری لرزه‌ای بیشتر می‌باشد؛ بنابراین، لایه‌های مربوطه در بستر یک سیستم اطلاعات جغرافیایی مطابق رابطه زیر تلفیق شدند:

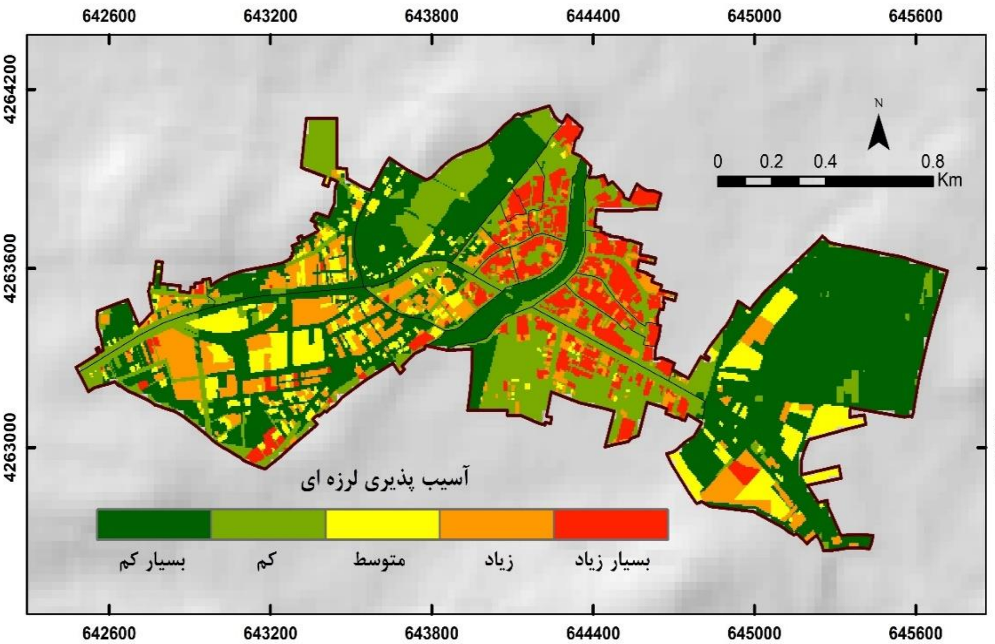
رابطه (۳) $$\text{Vulnerability} = \sum_{i=1}^{12} wi \times \text{Layer}_i$$

که در آن wi وزن هر لایه و Layer_i لایه رستری نرمال‌شده متناظر می‌باشد. نتیجه نهایی ترکیب لایه‌های موضوعی با استفاده از تئوری کاتاستروف به صورت شکل (١٤) است که نمایانگر آسیب‌پذیری فضایی شهر ورزقان در برابر مخاطره زلزله می‌باشد. این نقشه در یک حالت تطبیقی سطح شهر را از نظر آسیب‌پذیری در برابر زلزله با درنظر گرفتن ۱۲ متغیر انتخابی پهنه‌بندی می‌کند؛ بنابراین، می‌تواند به شناسایی کانون‌های بحرانی شهر در برابر خطر وقوع زلزله کمک شایانی نماید. در حالت کلی، محدوده قانونی شهر ورزقان از نظر میزان آسیب‌پذیری نسبت به رخداد زلزله به پنج کلاس (از پهنه‌های با آسیب‌پذیری کم تا پهنه‌های با آسیب‌پذیری بسیار بالا) طبقه‌بندی شد.

با مقایسه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و فضاهای ساخته شده شهر می‌توان بیان داشت که بخش قابل‌توجهی از شهر ورزقان از آسیب‌پذیری بالایی نسبت به رخداد زلزله برخوردار است؛ به طوری که پهنه‌های با آسیب‌پذیری کم در قسمت‌های مرکزی شهر به ندرت به چشم می‌خورند. درواقع، بخش قابل‌توجهی از هسته اصلی شهر در کلاس-های با آسیب‌پذیری بالا و بسیار بالا جای گرفته‌اند. سایر قسمت‌ها نیز از آسیب‌پذیری متوسطی برخوردار می‌باشند. در این رابطه، در حدود ۱۲ درصد از محدوده قانونی شهر ورزقان در کلاس آسیب‌پذیری زیاد و در حدود ۹ درصد آن در کلاس آسیب‌پذیری بسیار زیاد قرار گرفته است. با توجه به اینکه مساحت اراضی ساخته شده شهر در حدود ۳۲ درصد می‌باشد بنابراین درصد قابل‌توجهی از اراضی ساخته شده شهر در کلاس آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرد. پراکندگی این پهنه‌ها مخصوصاً در قسمت‌های مرکزی شهر بسیار چشمگیر است. درواقع، این پهنه‌ها را می‌توان بحرانی‌ترین منطقه شهر ورزقان در صورت رخداد زمین‌لرزه درنظر گرفت. تراکم بالای مسکونی و ساختمانی (این منطقه جزو متراکم‌ترین مناطق شهر ورزقان از نظر ساختمانی، مسکونی و جمعیتی می‌باشد)، ریزدانه بودن اکثریت ساختمان‌ها، کمبود فضاهای باز شهری، کیفیت پایین بناها و ساختمان‌ها و موارد مشابه باعث شده است که

1 Overlay

این منطقه نسبت به رخداد زلزله از آسیب‌پذیری شدیدی برخوردار باشد. درواقع، پهنه‌های با آسیب‌پذیری بالا منطبق بر هسته اولیه و قدیمی شهر ورزقان می‌باشد که عمدتاً جزو بافت فرسوده این شهر نیز می‌باشد.



شکل ۱۴- پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان با کاربرد مدل کاتاستروف (منبع: محاسبات نگارندگان)

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان واقع در استان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای زیادی در آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرها مؤثر هستند که هر کدام با توجه به توزیع فضایی خود دارای اهمیت متفاوتی می‌باشند. در پژوهش حاضر از ۱۲ متغیر طبیعی، سازه‌ای و برنامه‌ریزی به منظور ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر ورزقان استفاده به عمل آمد. برای روی‌هم‌گذاری و یکپارچه نمودن این متغیرها از توابع تئوری کاتاستروف در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته شد. این تکنیک جهت فائق آمدن بر مساله عدم قطعیت تصمیم‌گیری در فرایند وزن‌دهی به کار بسته شد. درواقع، در رویکرد مذکور وزن معیارها از طرق مکانیسم درونی سیستم و با بهره‌گیری از توابع فازی کاتاستروفیک استخراج می‌شود. از طرف دیگر، در ترکیب نهایی، متغیرهای پژوهش به صورت پیوسته وارد مدل می‌شوند و درنتیجه عدم قطعیت‌های مرتبط با کلاسه‌بندی داده‌ها نیز تا حد زیادی رفع می‌شود. از نقاط قوت رویکر مبتنی بر تئوری کاتاستروف می‌توان به بنیان ریاضیاتی، کاهش عدم قطعیت‌های مرتبط با فرایند تصمیم‌گیری و کلاسه‌بندی، تکرارپذیری نتایج، انعطاف بالا در تعداد متغیرها، لحاظ کردن توزیع فضایی متغیرها و قابلیت اجرا در تمامی شرایط جغرافیایی اشاره نمود. نتایج حاصل از پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر ورزقان با استفاده

ازاین‌رویکرد حاکی از کارایی بالای مدل مورد استفاده است. در این زمینه می‌توان به انطباق بالای پهنه‌های با آسیب-پذیری لرزه‌ای بالا با بافت‌های فرسوده شهر اشاره داشت. نتایج بیانگر این است که بخش اعظمی از فضاهای ساخته شده شهر ورزقان در برابر زلزله از آسیب‌پذیری بالایی برخوردار هستند. در این رابطه، بخش‌های مرکزی یا هسته اولیه شهر دارای شرایط حاد و بحرانی می‌باشد. به‌واقع، ترکیب مجموعه‌ای از متغیرها ازقبیل تراکم بالای مسکونی، قدمت زیاد ساختمان‌ها، کیفیت پایین بناها، محصورشدگی و عدم دسترسی مناسب به فضاهای باز شهری و غیره باعث شده است که بخش عمده‌ای از مرکز شهر نسبت به مخاطره زلزله از آسیب‌پذیری بسیار بالایی برخوردار باشد.

با توجه به آسیب‌پذیری بالای قسمت‌های مرکزی شهر ورزقان پیشنهاد می‌گردد که مطالعات و اقدامات بیشتری در خصوص نوسازی بافت‌های فرسوده، عریض نمودن کوچه‌ها و خیابان‌ها، افزایش فضاهای باز، احداث ایستگاه-های آتش‌نشانی و غیره صورت گیرد.

کتابنامه

احدنژاد روشتی، محسن؛ جلیل‌پور، شهناز؛ ۱۳۹۲. ارزیابی عوامل درونی تأثیرگذار در آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهری در برابر زلزله با استفاده از GIS (نمونه موردی: بافت قدیم شهر خوی). *فصلنامه آمایش محیط*، دوره ٦، شماره ۵۲،۲۰-۲۳.

آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایکا)؛ ۱۳۸۰. گزارش پروژه ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ. شهرداری تهران.

جعفرنیا، افشین؛ خرم‌بخت، احمدعلی؛ قنبری، عبدالرسول؛ ۱۳۹۸. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله با استفاده از منطق فازی در GIS، مطالعه موردی شهر لار. *فصل‌نامه جغرافیای طبیعی*، سال دوازدهم، شماره ۴۳، ۱۲۵-۱۰۵.

خدادادی، فاطمه؛ انتظاری، مژگان؛ ساسان‌پور، فرزانه؛ ۱۳۹۹. تحلیل آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطره زلزله با روش ELECTRE FUZZY (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج). *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، سال بیستم، شماره ٥٦، ۱۱۳-۹۳.

رحیمی شهید، مجتبی؛ رحیمی، نیما؛ ۱۳۹٦. پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان سمیرم). *یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*، دوره ۱۱، شماره ۲۲، ۱۱۸-۱۰۹.

رمضانی کیاسج‌محله، رؤیا؛ کریمی، سعید؛ علوی‌پور، فاطمه سادات؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر زلزله با استفاده از تکنیک WLC و OWA، موردشناسی: منطقه ۷ تهران. *جغرافیا و آمایش شهری- منطقه-ای*، شماره ۲۱، ۱۳۸-۱۲۵.

ساسان‌پور، فرزانه؛ شماعی، علی؛ افسر، مجید؛ سعیدپور، شراره؛ ۱۳۹٦. بررسی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر در برابر مخاطرات طبیعی (زلزله) (مطالعه موردی: محله محتشم کاشان). *مخاطرات محیط طبیعی*، سال ششم، شماره ١٤، ۱۲۲–۱۰۳.

سیدین، سید حسام؛ عباسی دولت‌آبادی، زهرا؛ سورانی، محمد؛ نقدی، سیران؛ رجبی‌فرد مزرعه نو؛ ۱۳۹۳. ارزیابی آسیب‌پذیری بیمارستان‌های عمومی دانشگاه علوم پزشکی تهران در مقابل زلزله. *مدیریت ارتقای سلامت*، جلد ۳، شماره ۲، ۷۱–٦٥.

طبیبیان، منوچهر؛ مظفری، نگین؛ ۱۳۹۷. ارزیابی آسیب‌پذیری بافت‌های مسکونی در برابر زلزله و راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری، مطالعه موردی: منطقه شش شهرداری تهران. *فصلنامه علمی- پژوهشی مطالعات شهری*، شماره بیست و هفت، ۱۱۲–۹۳.

فاضل، سوگل؛ تقوایی، مسعود؛ محمودزاده، امیر؛ ۱۳۹٦. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهری با استفاده از مدل ANP، مطالعه موردی: شهر نجف‌آباد. *دوفصلنامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران*، شماره یازدهم، ۱۳۲–۱۲۱.

فلاح علی آبادی، سعید؛ سلمانی ندوشن، ابراهیم؛ مقدم جعفر، امین؛ دهقانی فیروزآبادی، سعیده؛ ۱۳۹۵. اولویت‌بندی اقدامات مؤثر جهت ارتقای کیفیت خدمات ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر یزد با استفاده از روش AHP و TOPSIS. *فصلنامه علمی تخصصی طب کار*، دوره ۸ شماره ۲، ۸۹–۸۱.

فلاحی، علیرضا؛ اسدی، سعیده؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کالبدی بافت کهن کرمان در برابر زلزله احتمالی با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش آنتروپی. فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره ششم، شماره دوم، ۱۵۹–۱٤۹.

قنبری، ابوالفضل؛ سالکی ملکی، محمدعلی؛ قاسمی، معصومه؛ ۱۳۹۲. پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهرها در مقابل خطر زمین‌لرزه (نمونه موردی: شهر تبریز). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، شماره پنجم، ۳۵–۲۱.

کرمی، محمدرضا؛ امیریان، سهراب؛ ۱۳۹۷. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهری ناشی از زلزله با استفاده از مدل Fuzzy-AHP، مطالعه موردی شهر تبریز. *نشریه علمی- پژوهشی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی*، سال سوم، شماره ٦ (سری جدید)، پیاپی ۱۰، ۱۲٤–۱۱۰.

مهدوی‌فر، محمدرضا؛ معماریان، پرهام؛ ۱۳۹۱. گزارش شناسایی مقدماتی پدیده‌های ژئوتکنیکی ناشی از زلزله ورزقان (۱۳۹۱/۵/۲۱). پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

نوروزی طیولا، رعنا؛ بینایی، یوسف؛ ۱۳۹۷. پهنه‌بندی مناطق حساس و آسیب‌پذیری محیطی در منطقه یک کلان‌شهر تهران با روش طبقه‌بندی فازی و سلسله مراتبی. *پژوهش‌های دانش زمین*، سال نهم، شماره ۳۵، ۵۰–۳۵.

نیری، هادی؛ خالق‌پناه، کمال؛ کرمی، محمدرضا؛ احمدی، خه‌بات؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله با استفاده از دو مدل تحلیل سلسله مراتبی و مدل تاپسیس. *نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۲۰، شماره ۵۷، ۲۹٤–۲۷۷.

Ahmed, K., Shahid, Sh., Bin Harun, S., Ismail, T., Nawaz, N., Shamsudin, S., 2015. Assessment of groundwater potential zones in an arid region based on catastrophe theory. Earth Science Informatics, Vol. 8, Issue. 3: 539-549.

Alcántara-Ayala, I., Goudie, A.S., 2010. Geomorphological Hazards and Disaster Prevention. Cambridge University Press.

Armas, I., 2012. Multi-criteria vulnerability analysis to earthquake hazard of Bucharest, Romania. Natural Hazards 63:1129-1156.

Armas, L., Toma-Danila, D., Lonescu, R., Gavris, A., 2017. Vulnerability to earthquake hazard: Bucharest case study. International Journal of Disaster Risk Science 8: 182-195.

Coburn A, Spence R. 2003. Earthquake Protection, Journal of Seismology, Vol. 7, No. 2: 541-552.

Duzgun, H.S.B., Yucemen, M.S., Kalaycioglu, H.S., Celik, K., Kemec, S., Ertugay, K., Deniz, A., 2011. An integrated earthquake vulnerability assessment framework for urban areas. Natural Hazards 59: 917-947.

Jenks, GF., 1967. The data model concept in statistical mapping. Int Yearb Cartogr 7:186–190.

Keller, E. A., Pinter, N., 1996. Active Tectonic, Earthquake, Uplift and landscape. prentice hall.

Moradi, M., Delavar, M. R., Moshiri, B., 2014. A GIS-based multi-criteria decision-making approach for seismic vulnerability assessment using quantifier-guided OWA operator: a case study of Tehran, Iran. Annals of GIS 21: 209-222.

Rasheed, T., Weeks, J., 2012. Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. International Journal of Geographical Information Science 17: 547-576.

Sadeghfam, S., Hassanzadeh, Y., Nadiri, A.A., Khatibi, R., 2016. Mapping groundwater potential field using catastrophe fuzzy membership functions and Jenks optimization method: a case study of Maragheh-Bonab plain, Iran. Environmental Earth Sciences, 75(7). https://doi.org/10.1007/s12665-015-5107-y.

Sanders, M. H., Clark, P. D., 2010. Geomorphology: Processes, Taxonomy and Applications. Nova Science Publishers, Inc. 216 P.

Sinha, N., Priyanka, N., Joshi, P., 2014. Using spatial Multi-criteria analysis and ranking tool (SMART) in earthquake risk assessment: a case study of Delhi region, India. Geomatics, Natural Hazards and Risk 7: 680-701.

Su, Sh., Li, D., Yu, X., Zhang, Zh., Zhang, Q., Xiao, R., Zhi, J., Wu, J., 2011. Assessing land ecological security in Shanghai (China) based on catastrophe theory. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 25, Issue. 6: 737-746.

Tian-jun, Zh., Shu-xin, R., Shu-gang, L., Tian-cai, Zh., Hong-jie, X., 2009. Application of the catastrophe progression method in predicting coal and gas outburst. Mining Science and Technology, Vol. 19: 430-434.

Wang, Ch., Ni, F., Deng, Y., Jiang, L., 2011. Research on the Risk Associated with Rural Drinking Water Safety Based on Catastrophe Theory. Journal of Water Resource and Protection, Vol. 3: 356-362.

Xiao-jun, W., Jian-yun, Zh., Shahid, Sh., Xing-hui, X., Rui-min, H., Man-ting, Sh., 2014. Catastrophe theory to assess water security and adaptation strategy in the context of environmental change. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Vol. 19, Issue. 4: 463-477.

You, W. J., Zhang, Y. L., 2015. Evaluation of social vulnerability to floods in Huaihe River basin: a methodology based on catastrophe theory. Natural Hazard and Earth System Sciences, Vol. 3, Issue. 8: 4937-4965.

Zheng, H., Guo, L., Liu, J., Zhen, T., Deng, Z., 2020. Evaluating seismic risk in small and medium-sized cities with the modified vulnerability index method, a case study in Jiangyou City, China. Bull Earthquake Eng 18, 1303–1319, https://doi.org/10.1007/s10518-019-00757-3.